

# Joustava 3D-tulostettu betonimuotti



Kalle Nikula

Empiirinen tutkimus -kurssin tutkimusraportti

Muotoilun pääaine

Muotoilun laitos

Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu

Aalto-yliopisto

16.4.2021

# Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voiko 3D-tulostettuja muottipintoja käyttää betonin valamisessa siten, että muotin joustamisen kautta betonin pintaan tulee aaltoilevaa muotoa. Tutkimuksen inspiraationa toimi betonin valamisessa käytetyt kangasmuotit. Tulostettavista materiaaleista käytössä oli 3D-tulostuksessa hyvin yleinen materiaali PLA (polylaktidi), sekä joustavampi TPE (termoplastinen elastomeeri). Valukappaleet tehtiin neliön muotoisen puumuotin sisällä siten, että tutkimuksen kohteena oleva 3D-tulostettu muottipinta toimi muotin pohjana.

PLA-muovi toimi muottina, mutta muodot jäivät niin pieniksi, että sille tuskin löytyy käyttöä käytännössä. TPE:llä saatiin selkeästi enemmän muotoa aikaan ja sitä voisi ehkä käyttääkin kangasmuotin tapaan. Tässä tutkimuksessa TPE:n avulla ei kuitenkaan saatu tuotettua betoniin aivan niin dramaattisia muotoja kuin kangasmuoteilla. Toisaalta materiaalia ei välttämättä viety äärirajoille ja jatkotutkimukselle voisi olla aihetta.

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Sisällysluettelo.....	3
1 Johdanto.....	4
2 3D-tulostus.....	7
3 Koejärjestelyt.....	9
3.1 Kimmokertoimen mittaus taivutuskokeella.....	9
3.2 Valukokeet.....	10
4 Tulokset.....	11
4.1 Kimmokerroin.....	11
4.2 Valukokeiden tulokset.....	12
5 Johtopäätökset.....	16
Lähdeluettelo.....	17

# 1 Johdanto

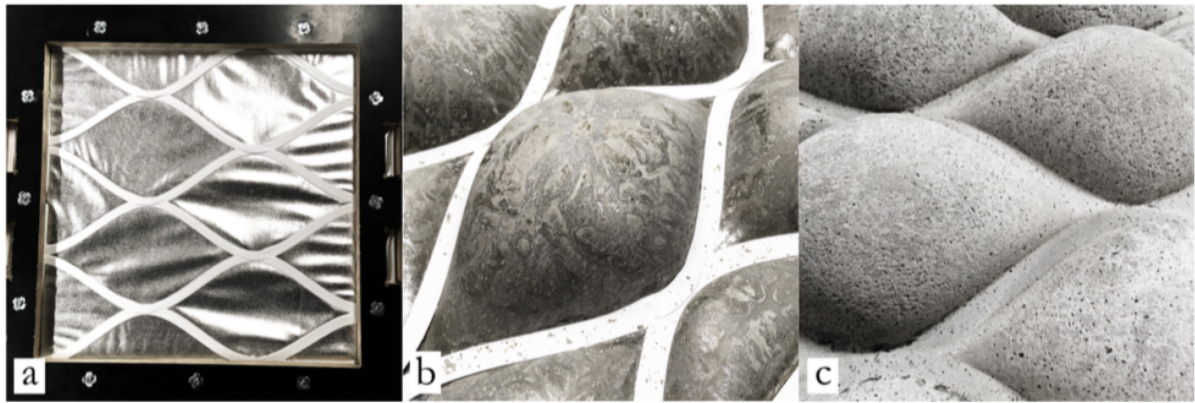
Tutkimuksessani yritän selvittää, voisiko ohutta joustavaa 3D-tulostetta käyttää betonimuottina. Betonin pintaan on tehty monenlaista vaihtelevaa muotoa käyttämällä kangasta muottimateriaalina. Suomessa tällaisia rakenteita on suunnitellut Renata Jakowleff Muotobetoni Oy:ssa (<https://muotobetoni.fi/>). Tuloksena syntyneet betonipinnat ovat varsin tyylikkäitä ja mielenkiintoisia (kuva 1). Jakowleff sai tästä työstä Ornamo-palkinnon vuonna 2018. Muotobetoni ei kerro mitä materiaaleja he tarkalleen käyttävät. Nettisivujen perusteella vaikuttaa siltä, että kangas on joustavaa. Tukirakenteistakaan ei ole annettu tietoa.



*Kuva 1: Muotobetonin tekemä betoniseinä. (<https://muotobetoni.fi/collections>)*

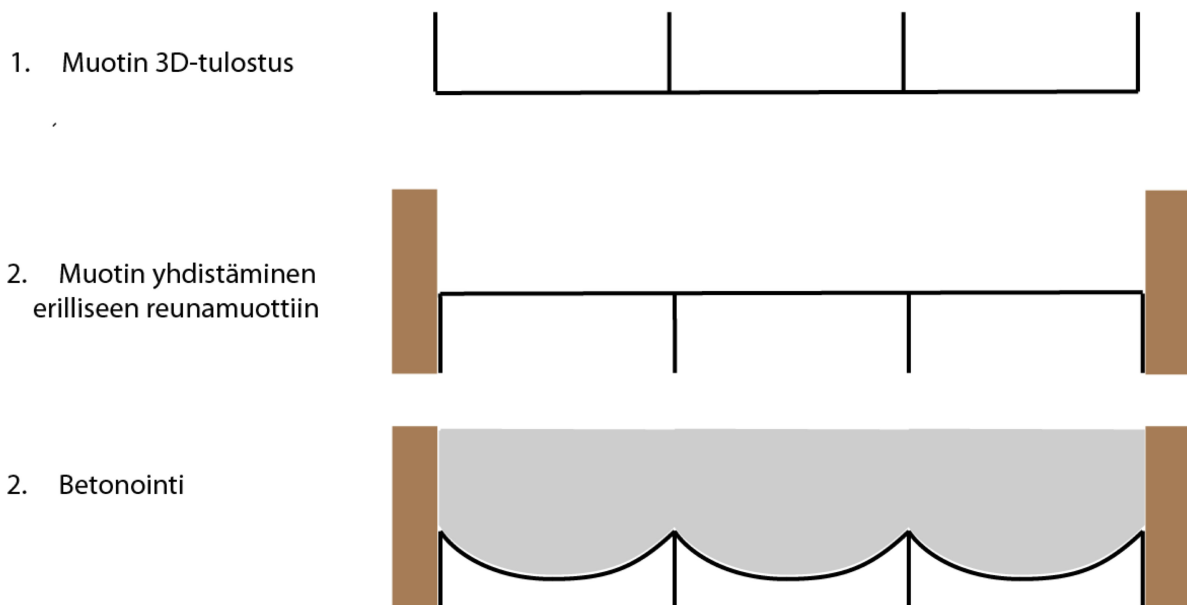
Aarhusin yliopistossa Tanskassa Jon Engholt ja Dave Pigram ovat tehneet tutkimusta joustavien kankaiden yhdistämisestä 3D-printattuihin tukirakenteisiin. Heidän menetelmässään 3D-tulostettu tukirakenne printataan suoraan kankaaseen kiinni (Engholt & Pigram 2019). Tämä menetelmä osoittautui varsin toimivaksi. Haasteena heillä oli sopivan materiaaliparin löytäminen, sillä mikä tahansa kangas ei tartu 3D-tulosteeseen ja lisäksi kankaan piti olla joustava ja ilmatiivis. Toimivaksi kankaaksi osoittauti nestemäisellä foliolla päällystetty lycra (liquid foil coated lycra). (Engholt & Pigram 2019, 56.) Tulostusmateriaalina he käyttivät ABS ja PLA -muoveja. ABS:n ongelmana oli muovin voimakas kutistuma, mikä aiheutti kankaan rypistymistä ja koko rakenteen vääristymistä. PLA toimi paremmin, mutta se häviää ABS:lle sitkeydessä. (Engholt & Pigram 2019, 59.) Kuvassa 2 on esitetty Engholtin ja Pigramin tekemä muotti ja valmis betonikappale.





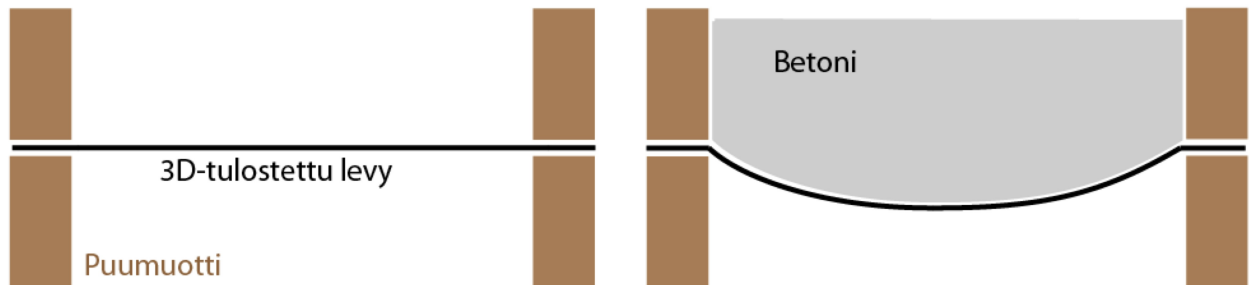
Kuva 2: Joustava kangas ja 3D-printattu tukirakenne. (Engholt ja Pigram 2019, 59).

Ajatuksenani on kokeilla, olisiko muotti toimiva, jos myös kankaan korvaisi 3D-tulosteella. Muotti siis koostuisi ohuesta 3D-printatusta pinnasta ja tukirakenteesta. Pinta ja tukirakenne voisivat olla joko samaa tai eri materiaalia. Etuna olisi prosessin yksinkertaistaminen, kun sekä muotin että tukirakenteen voisi valmistaa yhtäaikaaisesti saman 3D-mallin pohjalta. Lisäksi 3D-tulostuksen avulla voisi saada aikaiseksi efektejä, mitkä ovat mahdottomia tai vaikeita toteuttaa kangasmuotilla. Näitä voisivat olla erilaiset muottipinnan paksuuden vaihtelut ja kuvioinnit. Haasteena on, voiko 3D-tulostettuun pintaan saada niin paljon taipumaa, että syntyvä muoto on riittävän mielenkiintoinen. 3D-tulostimella voisi toki tehdä myös muotin, jossa esimerkiksi kuvan 2 kaltainen pullistunut pinta on valmiiksi mallinnettuna. Tämä kuitenkin tarkoittaisi suurta materiaalimenekkiä muotin teossa. Lisäksi muodon variointi olisi paljon työläämpää kuin muotilla, joka perustuu pinnan muodonmuutokseen. Kuvassa 3 on esitettyä periaatekuva siitä, kuinka kerralla tulostettu muotti voisi toimia.



Kuva 3: 3D-tulostetun muotin käyttö.

Tässä tutkimuksessa valukokeet tehdään puusta rakennetun laatikon avulla, jotta koekappaleet ovat nopeasti tulostettavissa (kuva 4). Kokeissa käytetään PLA:ta (polylaktidi) ja TPE:tä (termoplastinen elastomeeri). PLA-levyille tehdään ensin myös taivutuskokeita, joiden avulla pyritään määrittämään ohuen tulosteen kimmokerroin. Tämän avulla yritän laskennallisesti ennustaa levyn taipumaa valettaessa.



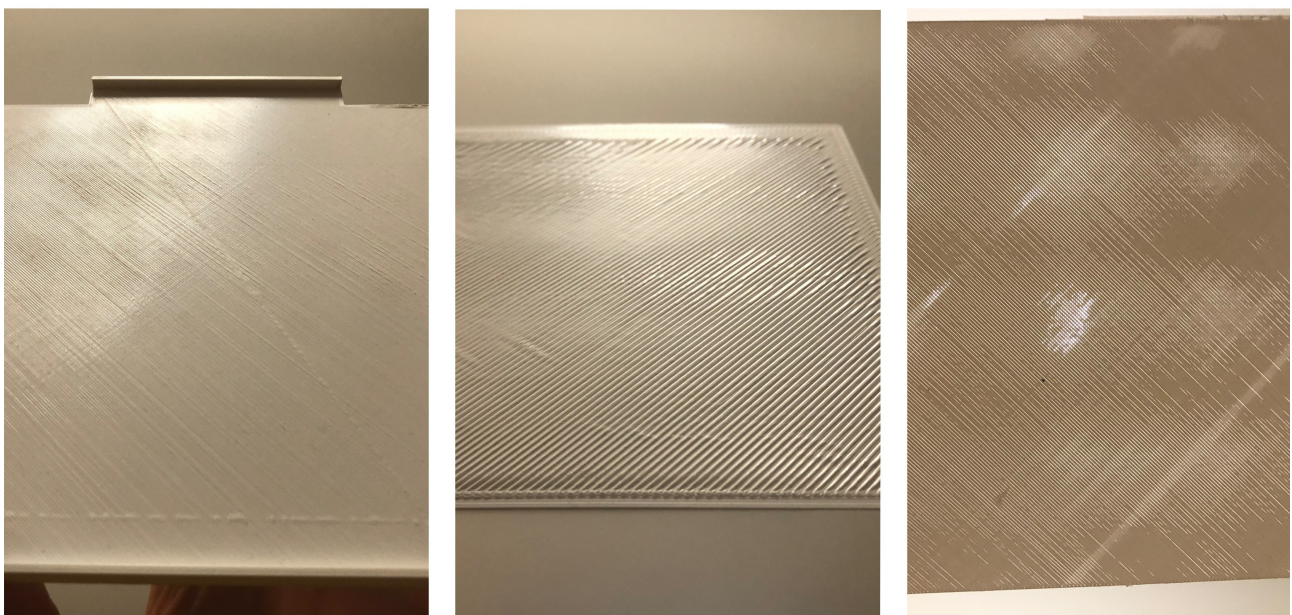
*Kuva 4: Valukokeen periaatekuva.*

## 2 3D-tulostus

3D-tulostuksessa käytettävissä on kahta erilaista materiaalia: PLA:ta (polylaktidi) ja TPE:tä (termoplastinen elastomeeri). Taivutuskokeessa käytetyt koekappaleet ovat neliöitä sivu- mitoiltaan 150 mm. Taivutuskoe tehdään vain PLA-muovilla. Valukokeessa laatikon sisämitta on 155\*155 mm. Valukokeen koekappaleet ovat ulkomitoiltaan 196\*196 mm, jotta levyjen reunat jäävät laatikon seinien väliin.

PLA:n tulostuksessa käytetään tuotetta colorFabb PLA Economy. Sen valmistajan ilmoittama vetolujuus on 45 MPa ja kimmokerroin 3400 MPa (colorFabb, tds). Tulostuksessa käytettävä kone on Ultimaker 2+, jonka suurin työalue on 200\*200\*205 mm. Tällä tulostimella tulostettiin 1 mm:n ja 0,5 mm:n paksuisia koekappaleita. Millimetrin paksuiset koekappaleet tulostettiin 0,8 mm:n suuttimella käyttäen 0,2 mm:n kerrospaksuutta. Yksi levy koostuu viidestä kerroksesta, jotka ovat 45 asteen kulmassa levyyn nähden ja 90 asteen kulmassa vierekkäiseen kerrokseen nähden.

0,5 mm:n paksuiset koekappaleet tulostettiin sekä 0,8 mm:n että 0,4 mm:n suuttimella. 0,8 mm:n suuttimella varustettu kone ei jostain syystä suostunut tulostamaan kuin yhdessä kerroksessa. 0,4 mm:n suuttimella tulostui kahdessa kerroksessa. Näissä 0,4 mm:n suuttimella tehdyissä tulosteissa laadunvaihtelu oli varsin suurta. Joihinkin tulosteisiin jäi harvoja kohtia. Valukoetta varten tehty kappale kuitenkin onnistui hyvin. Pajamestari Manuel Fonseca Martínez epäili laatuongelmien syyksi sitä, että 0,25 mm:n kerrospaksuus on turhan suuri käytettäessä 0,4 mm:n suutinta. Kuvassa 5 on esitettyinä puolen millin paksuisia PLA-muotteja.

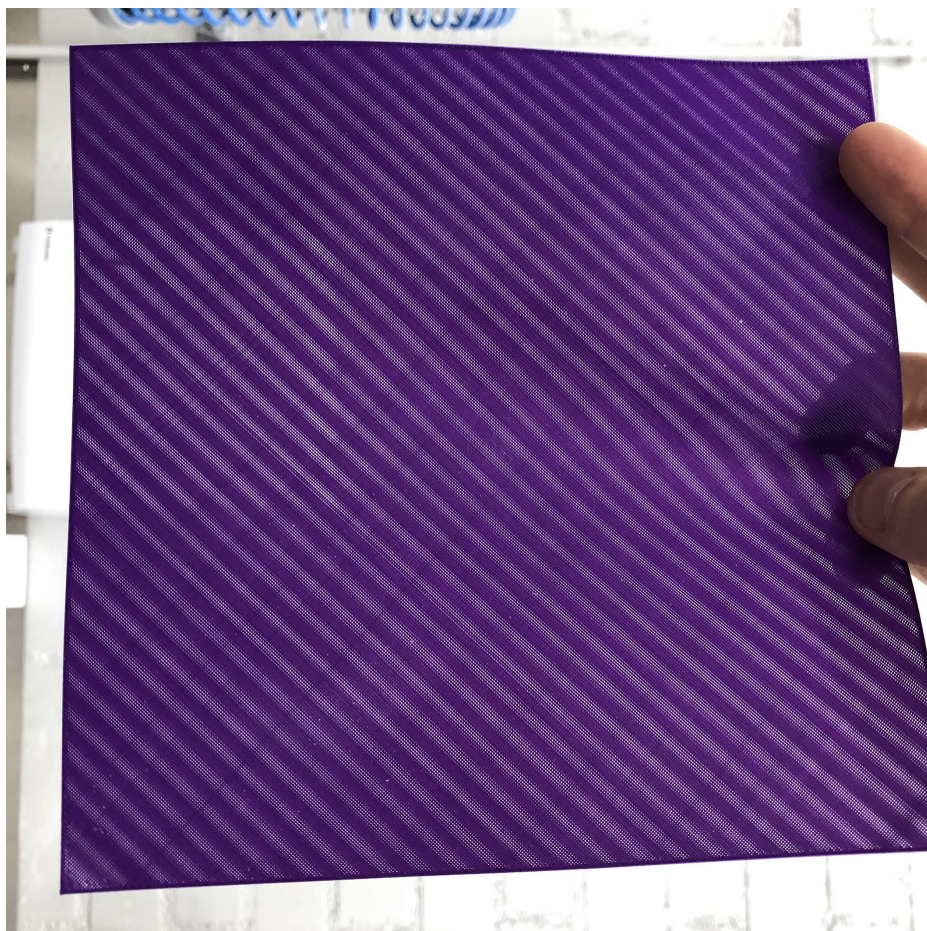


*Kuva 5: 0,5 mm:n paksuisia koekappaleita.*



TPE:n tulostuksessa käytettävä kone on Raise3D E2. Sen suurin työalue on 330\*240\*240 mm. Tulostuksessa käytetään tuotetta Filaflex 82A. Sen valmistajan ilmoittama vetolujuus on 45 MPa (Recreus, tds). Koska TPE on elastomeeri, sen jäykkyys riippuu jännityksestä ja valmistaja ei ilmoita sille yhtä kimmokerrointa. Valmistajan mukaan jännityksen ollessa 2,5 MPa venymä on 20% (Recreus, tds). Tästä saadaan Hooken lain mukaan laskettua TPE:n kimmokertoimeksi  $E = 2,5 \text{ MPa} / 0,2 = 12,5 \text{ MPa}$  (Pennala, 23). Suuremmilla jännityksillä kimmokerroin on pienempi. Jännityksen ollessa 10 MPa kimmokerroin on enää 3,3 MPa. Elastomeerina TPE on siis huomattavasti joustavampaa kuin PLA ja siten taivutuskokeiden tekeminen TPE:n avulla ei ole järkevää.

Koska TPE on huomattavasti joustavampaa kuin PLA, oli tarkoitus tulostaa 3 mm paksu koekappale valukoetta varten. Tulostustiedostossa oli kuitenkin jotain vikaa ja tuloste jäi 1,2 mm korkeaksi. TPE:llä tulostettiin toinenkin koekappale, paksuudeltaan 0,5 mm (kuva 6). Tähän tuli harvoja kohtia samaan tapaan kuin ohuilla PLA-levyillä. Tätä voisi korjata syöttönopeutta säätämällä, mutta tällä kertaa tyydyttiin tähän kappaleeseen, sillä se kuitenkin oli riittävän tiivis betonin valamiseen.



*Kuva 6: 0,5 mm:n TPE-muotti.*

### 3 Koejärjestelyt

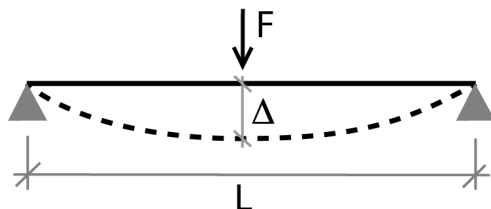
#### 3.1 Kimmokertoimen mittaus taivutuskokeella

Taivutuskokeessa koekappale asetetaan kahden tuolin väliin ja sitä kuormitetaan keskeltä keskitetyllä kuormalla. Tätä varten on 3D-tulostettu henkari, jonka varaan voi ripustaa kuorman (kuva 7). Tämän kokeen tarkoituksena on selvittää kuinka paljon printtausprosessi vaikuttaa levyn jäykkyyteen. Tulosta verrataan valmistajan ilmoittamaan kimmokertoimeen. Saatua kimmokerrointa käytetään myös valun aikana tapahtuvan taipuman ennustamiseen.



Kuva 7: Taivutuskoe.

Taipuman ja kuorman avulla voidaan määrittää levyn kimmokerroin. Kaavat löytyvät lujuusopin oppikirjasta (Pennala, 57, 92).



$$\text{Levyn jäyhyysmomentti: } I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \begin{array}{l} b = \text{levyn leveys} \\ h = \text{levyn korkeus} \end{array} \quad (1)$$

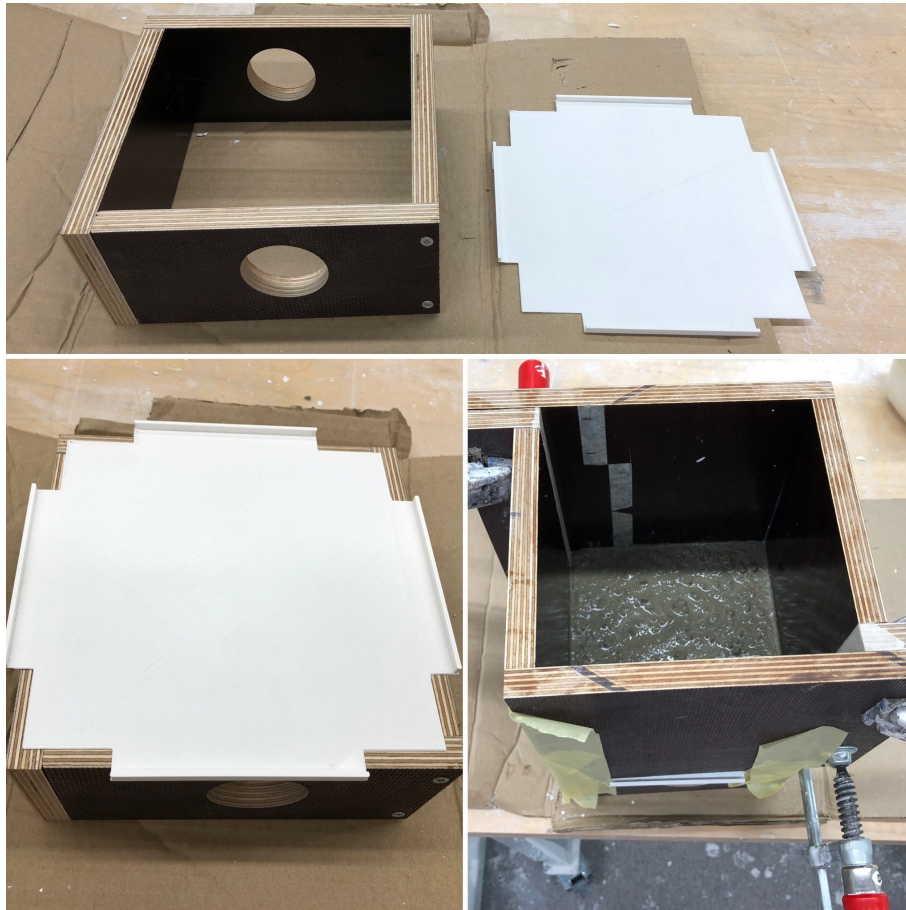
$$\text{Levyn taipuma: } \Delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \begin{array}{l} F = \text{kuorma} \\ L = \text{jännemitta} \end{array} \quad (2)$$

$$\text{Kimmokerroin: } E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta \cdot I} \quad \Delta = \text{taipuma} \quad (3)$$



### 3.2 Valukokeet

Valukokeissa käytetyt koekappaleet ovat 1 ja 0,5 mm paksut PLA-levyt sekä 1,2 ja 0,5 mm paksut TPE-levyt. Betonina käytetään Weber S100 kuivabetonia. Valuprosessin vaiheita on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Valujärjestelyt.

Muotissa esiintyvää taipumaa yritetään ennustaa taulukkokirjasta löytyvien kaavojen avulla (Young, W & Budynas, R, 508). Kaavoihin sisältyy oletus, että muottilevyn reunat pääsevät liukumaan. PLA:ta käytettäessä liukumavaraa on ja PLA-levyä ei puristeta pystysuunnassa.

Kuorma levyn päällä:  $q = h_c \cdot \rho_c$

$h_c$  = betonin korkeus  
 $\rho_c$  = betonin tiheys (4)

Levyn taipuma:  $\Delta = 0,0138 \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot h^3}$

$h$  = levyn korkeus  
 $L$  = levyn sivumitta  
 $E$  = kimmokerroin (5)

Levyn taivutusjännitys:  $\sigma = 0,3078 \cdot \frac{q \cdot L^2}{h^2}$

(6)

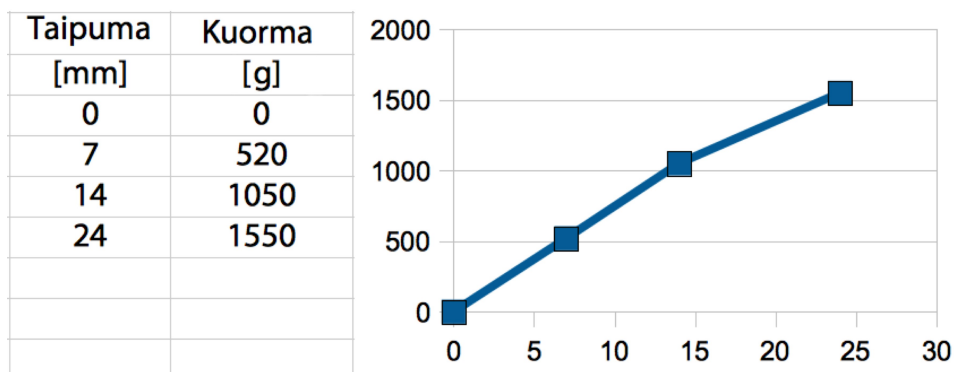
## 4 Tulokset

### 4.1 Kimmokerroin

Millimetrin paksuisella levyllä kimmokertoimeksi saadaan 1840 MPa, joka on selkeästi alhaisempi kuin valmistajan filamentille ilmoittama 3400 MPa. Tämä käy järkeen, koska tulostusmenetelmä tuo rakenteeseen epätäydellisyyttä puhtaaseen materiaaliin verrattuna. Tuloksessa on varmaan jonkin verran epätarkkuutta, koska koekappaleita oli vain yksi ja kotona tehty mittausjärjestelykään ei välttämättä ole kovin tarkka. Epätarkkuutta tuo ainakin kitka, mikä syntyy levyn ja tuolin välille. Alla kaavojen 1...3 avulla tehty laskenta:

Levyn paksuus ja leveys:	$h := 1\text{mm} \quad b := 150\text{mm}$
Levyn jäykkyys ja taivutusvastus:	$I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 12.5 \cdot \text{mm}^4$
Pistekuorma:	$F := 1.56\text{kg} \cdot g = 15.3\text{ N}$
Jännemitta:	$L := 120\text{mm}$
Mitattu taipuma:	$\delta_{\text{mit}} := 24\text{mm}$
Kimmokerroin:	$E := \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot L^3}{\delta_{\text{mit}} \cdot I} = 1.84 \cdot \text{GPa}$

Kuvassa 9 on esitetty millimetrin paksuisen levyn taipumamittauksen tulos kolmella eri kuormalla. Nähdään, että taipuma kasvaa varsin lineaarisesti suhteessa kuorman lisäykseen. Jonkinasteista epälineaarisuutta on havaittavissa suuremmilla kuormilla. Mittausjärjestelyt ovat kuitenkin varsin suurpiirteiset, joten tuloksia voi pitää vain suuntaa antavina.



Kuva 9: Kuorma taipuman funktion 1 mm:n levyllä.

0,5 mm:n paksuisella levyllä sama mittaus osoittautui haastavaksi, koska levy on niin löysä. Laskemalla jännemitta 80 millimetriin mittaus onnistui 520 g:n kuormalla. Taipumaksi tuli tällä kuormalla 16 mm ja kimmokertoimeksi 2100 MPa.



## 4.2 Valukokeiden tulokset

Ensimmäisessä kokeessa puolen millimetrin paksuista PLA-muottia kuormitettiin n. 50 mm:n korkuisella betonikerroksella. Levy taipui jonkin verran, mutta selvästi vähemmän kuin kaavojen 4...6 ennustama 38 mm. Tämä johtuu siitä, että kaavat olettavat levyn reunojen pääsevän liukumään ja kokeessa tätä liukumista ei tapahtunut. Levyyn syntyvät kalvovoimat jäykistävät levyä huomattavasti siihen verrattuna, että se toimisi pelkästään taivutettuna rakenteena. Levy kesti n. 20...30 minuuttia ennen kuin se meni rikki. Jännitys ja taipuma kaavoilla 4...6 laskettuna:

Betonin paksuus:	$h_c := 50\text{mm}$	Betonin tiheys:	$\rho_c := 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Jännemitta:	$L := 155\text{mm}$
Kuorma:	$q := h_c \cdot \rho_c = 1.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	Levyn paksuus:	$h := 0.5\text{mm}$	Kimmokerroin:	$E := 1.84\text{GPa}$
Levyn suurin taivutusjännitys:	$\sigma := 0.3078 \cdot \frac{q \cdot L^2}{h^2} = 32.54 \cdot \text{MPa}$				
Levyn suurin taipuma:	$\Delta := 0.0138 \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot h^3} = 38.1 \cdot \text{mm}$				

Toisessa kokeessa millimetrin paksuista PLA-levyä kuormitettiin samalla betonikuormalla. Tällä kertaa levy kesti, mutta taipuma jäi selkeästi pienemmäksi kuin laskelmien ennustama 4,8 mm. Toteutunut taipuma on n. 2 mm (kuva 10). Vertailun vuoksi esitetään laskelmat, vaikka ne eivät lopulta vastanneetkaan koetilannetta:

Betonin paksuus:	$h_c := 50\text{mm}$	Betonin tiheys:	$\rho_c := 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Jännemitta:	$L := 155\text{mm}$
Kuorma:	$q := h_c \cdot \rho_c = 1.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	Levyn paksuus:	$h := 1\text{mm}$	Kimmokerroin:	$E := 1.84\text{GPa}$
Levyn suurin taivutusjännitys:	$\sigma := 0.3078 \cdot \frac{q \cdot L^2}{h^2} = 8.13 \cdot \text{MPa}$				
Levyn suurin taipuma:	$\Delta := 0.0138 \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot h^3} = 4.76 \cdot \text{mm}$				



Kuva 10: Valukappale, kun levyn paksuus 1 mm ja betonin paksuus 5 cm.

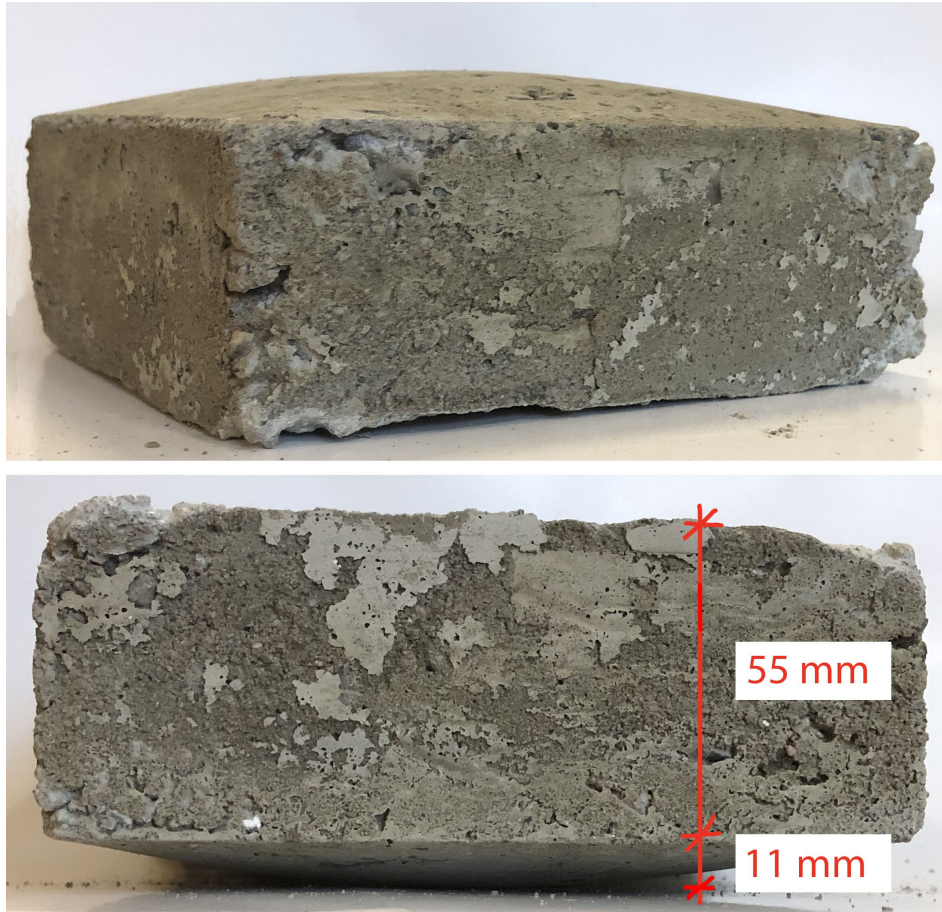
Seuraavaksi samaa millimetrin paksuista PLA-muottia kuormitettiin 150 mm korkealla betoni-kerroksella. Muotti kesti kuormaa jonkin aikaa ennen kuin se meni rikki. Levy rikkoutui siten, että repeämä lähti liikkeelle keskeltä neliön sivua seinän vierestä. Kuvassa 11 on esitetty rikkoutunut PLA-levy valun jälkeen.



*Kuva 11: Millimetrin paksuinen levy toisen valun jälkeen.*



TPE-muotilla valettaessa pystyin toteamaan, että onneksi 3 mm:n paksuinen koekappale ei toteutunut, sillä se olisi ollut aivan liian jäykkä. 1,2 mm:n paksuisella muotilla saatiin jo selkeää pullistumaa aikaiseksi. Noin 60 mm:n korkuisella valulla muodonmuutosta tuli 11 mm. Mittasin pullistuman asettamalla valukappaleen kupera puoli alaspäin pöydälle. Kuvassa 12 esitettynä tämän valun tulos kupera puoli ylöspäin ja alaspäin.



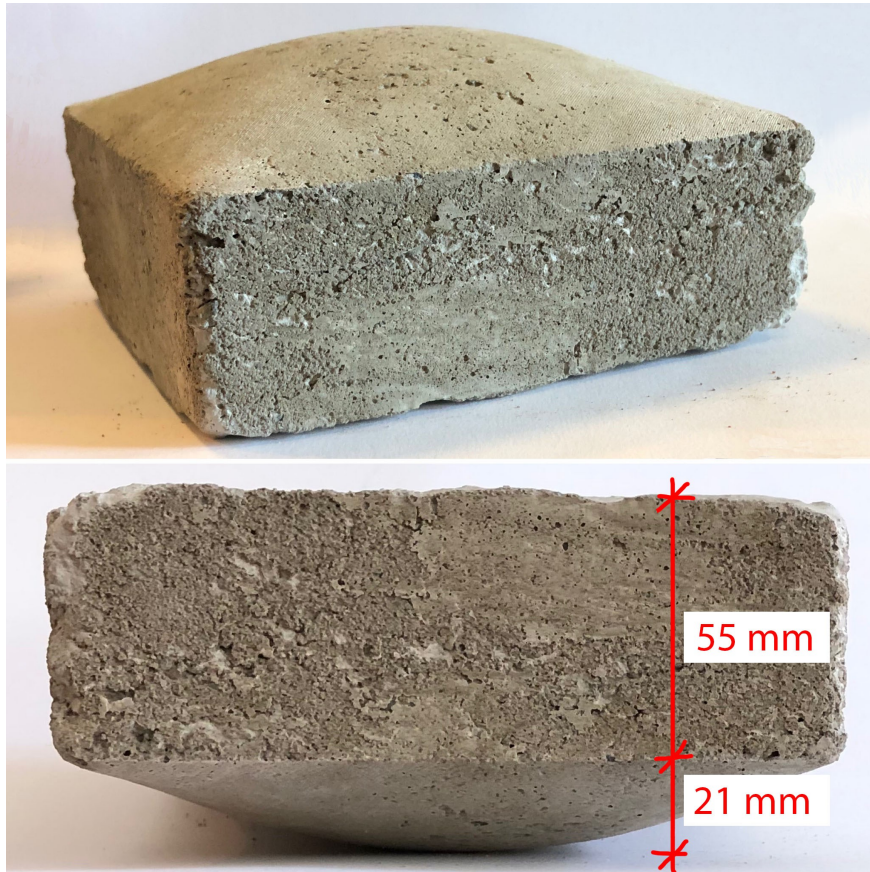
*Kuva 12: 1,2 mm:n paksuinen TPE-muotti ja n. 60 mm:n betonivalu*

Samalla 1,2 mm:n TPE-muotilla tehtiin toinen n. 160 mm korkea valu (kuva 13). Tällä kertaa pullistumaa tuli n. 14 mm. Ensimmäisen valun jälkeen muottiin jäi jonkin verran palautumatonta muodonmuutosta, mutta siitä ei tuntunut olevan haittaa uudelleen valettaessa.

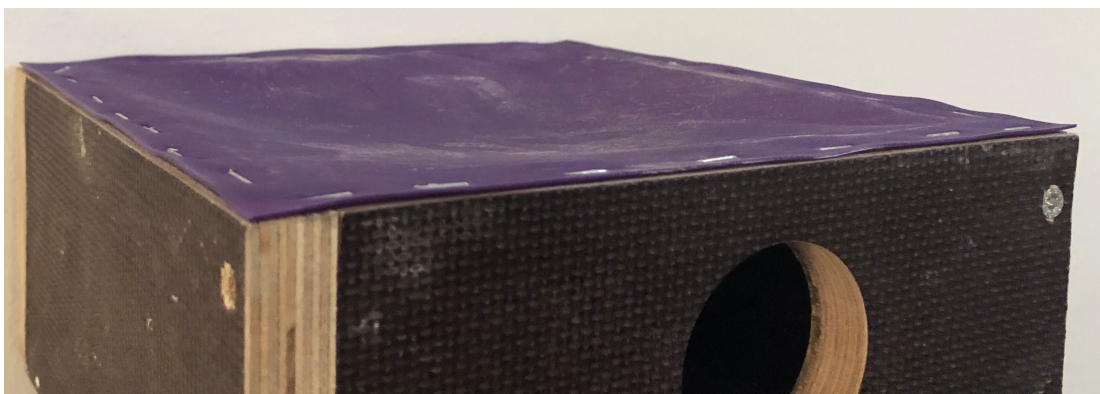


*Kuva 13: 1,2 mm:n paksuinen TPE-muotti ja 160 mm korkea betonivalu.*

0,5 mm:n paksuisella TPE-muotilla ja n. 60 mm korkealla valulla muotin taipumaksi tuli 21 mm. Kuvassa 14 on esitettyä tämän valun tulos kupera puoli ylöspäin ja alaspäin. Kuvassa 15 on esitetty muottiin jäänyt pysyvä muodonmuutos. Pysyvä taipuma on n. 9 mm.



*Kuva 14: 0,5 mm:n paksuinen TPE-muotti ja n. 60 mm korkea betonivalu.*



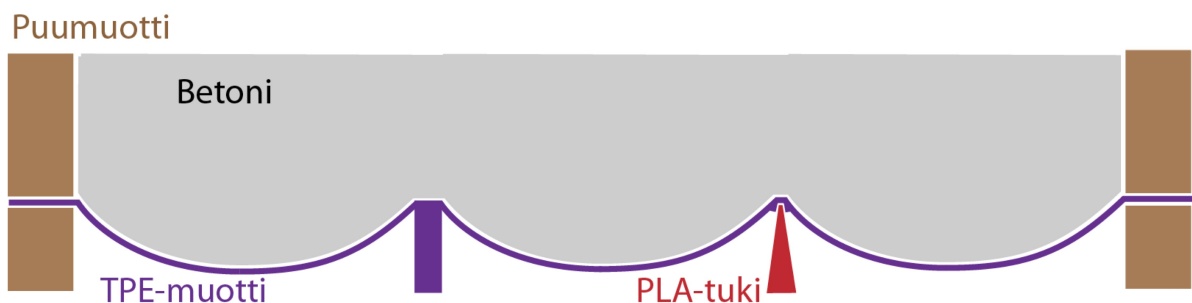
*Kuva 15: 0,5 mm:n TPE-muottiin jäänyt muodonmuutos.*



## 5 Johtopäätökset

Tavanomaista PLA-muovia käyttäen betonin muodot jäivät todella vaatimattomiksi. Valukokeita ei ollut mahdollista tehdä kovin montaa, mutta niiden perusteelta materiaalin kestävyyskin vaikuttaa huonolta. Muotoa voisi saada enemmän aikaiseksi mahdollistamalla muotin reunojen vapaan siirtymisen. Jos reunat ovat kiinni, levyyn syntyvät kalvovoimat jäykistävät muottia varsin paljon. Reunojen vapauttaminen kuitenkin rajoittaa varsin paljon mahdollisia sovelluksia. Siten PLA tuskin on järkevä materiaali joustavan betonimuotin tekoon.

TPE osoittautui jossain määrin toimivaksi. Sen avulla saadaan tehtyä jo silmin nähden kaareva pinta, mutta ei ihan niin dramaattisia muotoja kuin joustavan kankaan avulla. Tässä tutkimuksessa en tosin vienyt TPE-muotteja ihan äärimmilleen. Aiheesta voisi vielä tehdä jatkotutkimusta. Jatkotutkimuksella voisi myös selvittää, että onko TPE tarpeeksi jäykkää siihen, että tukirakenteet voi tulostaa samalla materiaalilla. TPE:stä tehdyt tukirakenteet ovat varmaan tehtävissä, kunhan ne tekee riittävän paksuiksi. Vaihtoehtoisesti tukirakenteita voisi tehdä myös PLA:sta. Kuvassa 16 on esitettyä ajatuksia siitä, kuinka ideaa voisi viedä eteenpäin. Lisätutkimuksissa voisi myös tehdä muottipintaan paksuuden vaihteluita ja kuvioita. Tässä tutkimuksessa en ehtinyt kunnolla tutkimaan myöskään uudelleenvalettavuutta. Vaikutti kuitenkin siltä, että TPE säilytti ominaisuutensa varsin hyvin, vaikka muotti jäikin valun jälkeen pysyvästi kuopalle.



Kuva 16: Ideoita jatkotutkimuksia varten.

# Lähdeluettelo

## Julkaisut:

Engholt, J & Pigram, D. Tailored Flexibility. 2019. Aarhus School of Architecture.

[http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2019\\_636.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2019_636.pdf) haettu 12.4.2021

Pennala, E. Lujuusopin perusteet, neljäs painos. 1988. Otakustantamo

Young, W & Budynas, R. Roark's Formulas for Stress and Strain, seventh edition. 2002. McGraw-Hill

## Lähteet internetistä:

<https://muotobetoni.fi/> haettu 12.4.2021

<https://www.aalto.fi/fi/taiteiden-ja-suunnittelun-korkeakoulun-tyopajat/3d-print>

haettu 12.4.2021

PLA:n tekniset tiedot:

colorFabb, Technical Data Sheet,

[https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS\\_E\\_ColorFabb\\_Economy\\_PLA.pdf](https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_Economy_PLA.pdf)

haettu 12.4.2021

TPE:n tekniset tiedot:

Recreus, Technical Data Sheet,

[https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1\\_AFXbDuUfFfOOaafvPbDihpd7lZbgRng](https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1_AFXbDuUfFfOOaafvPbDihpd7lZbgRng),

haettu 12.4.2021

## Henkilökohtaiset tiedonannot:

Keskustelut pajamestari Manuel Fonseca Martínezin kanssa